

# 大強度加速器施設におけるビームプロファイル診断技術の開発

Development of beam profile diagnostic for high-intensity accelerator facility

明午 伸一郎<sup>1)</sup> 中野 敬太<sup>1)</sup> 山口 雄司<sup>1)</sup> 大久保 成彰<sup>2)</sup> 湯山 貴裕<sup>3)</sup>

Shin-ichiro MEIGO Hiroki MATSUDA Keita NAKANO Takanori YUYAMA

<sup>1)</sup>原子力機構 J-PARC センター <sup>2)</sup>原子力機構 原子力基礎工学研究センター

<sup>3)</sup>量研 高崎

## (概要)

大強度陽子加速器施設の標的に入射するビーム形状(プロファイル)を観測することは、施設を安定に運転する上で重要となる。プロファイルには、長期間の大強度陽子ビーム運転に耐えうることが要求される。モニタ開発の一環として、アルミナ等の蛍光試料にビームを入射し、蛍光スペクトルとその振舞いを測定した。J-PARC センターの大強度核破砕中性子源のプロファイルモニタに用いられる炭化ケイ素 (SiC) ワイヤにおける、ビーム入射時の二次電子放出の振舞いを測定した。

**キーワード：**大強度陽子ビーム、プロファイルモニタ、蛍光、アルミナ、セラミック、SiC

## 1. 目的

ビーム電流 20 mA の 1.5 GeV 陽子ビームを用いる大強度陽子加速器 (ビーム出力 30 MW) により原子炉で生じたマイナーアクチノイド等の放射性廃棄物の有毒度を低減する核変換システムを原子力機構では検討している。また、J-PARC センターの核破砕中性子源 (JSNS) では、3 GeV 陽子を用い、大強度陽子ビームの運転 (800 kW) を行っている。これら施設の安定した運転には、標的に入射するビームプロファイルの測定が重要となり、長期間の大強度陽子ビームに耐えられるビームプロファイルモニタの開発が重要となる。

モニタは、アルミナ等の蛍光体を標的に塗布し、ビーム起因の蛍光によりプロファイルを取得する方法が候補となる。オークリッジ国立研究所の核破砕中性子源 (SNS) では、標的容器にクロムを含むアルミナを標的容器に塗付し、蛍光によるプロファイルの測定を行っているが、陽子ビームによる蛍光量減衰が顕著となり明確なプロファイル測定が困難となっている。JSNS では、炭化ケイ素 (SiC) のワイヤから生じる二次電子電流の測定により、プロファイルを取得している [1]。長期間の大強度陽子に対し、二次電子の放出率が懸念されるため、定量的な測定評価が必要となる。

耐放射線性に優れたビームプロファイルモニタの開発のため、陽子に比べ高い LET および原子あたりのはじき出し数 (dpa) を与える重イオンビーム (図 1) を用い、陽子入射を模擬した損傷加速試験を行った。候補となる蛍光型プロファイルモニタの材料に対し、重イオンビーム (Ar, Xe) を照射し、その蛍光劣化等を調査した。また JSNS においてビームプロファイルモニタに使用している、SiC ワイヤにビームを照射し、照射中における二次電子放出率の劣化に関して調査した。

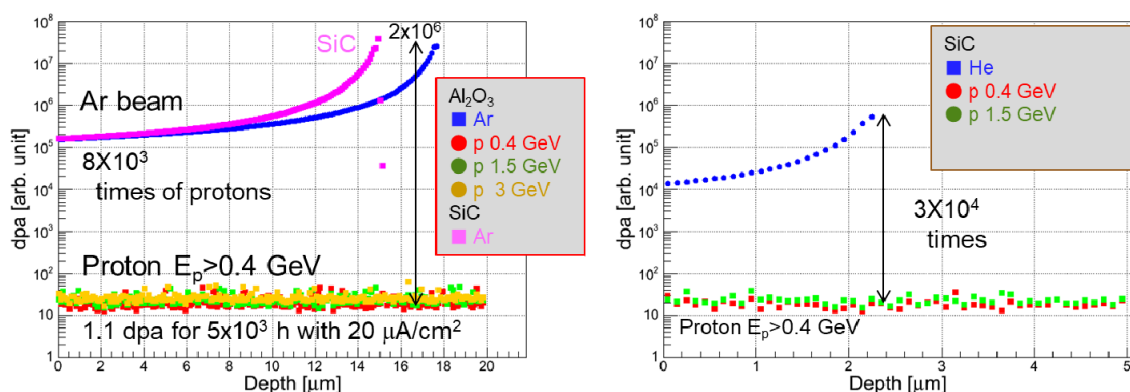


図 1: Ar および SiC における入射ビーム種に対する原子の弾き出し (dpa) の計算値

## 2. 実施方法

### 2.1 蛍光型プロファイルモニタ試験

107 MeV  $^{40}\text{Ar}^{8+}$  および 350 MeV  $^{129}\text{Xe}^{26+}$  ビームを入射し、蛍光の発光スペクトルとその強度をスペクトロメータ (Flame-NIR: Ocean Photonics) により測定した。図 2 に実験の体系を示す。ビーム照射は LB2 ポートで行い、ビーム位置の受光感度を均一にするために、八極電磁石による非線形ビーム光学による均一ビームを用いた。ビーム形状や発光状態の確認のため、カメラを用いて撮影を行った。試料には、実際に ADS などを使用する状態を想定し Al 母材に溶射可能であるアルミナ (PA, 50P, PW, 50A) (表 1 参照) を用いた。比較のため、0.5%のクロムをドーパしたアルミナ (AF995R) も用いた。ビーム照射する前の紫外線照射により、試料の発光状態やスペクトロメータの動作状況を確認した。バックグラウンドとなる迷光を防ぐため、真空ポートのビューポートは全て遮光した。

ビーム電流はファラデーカップにより測定した。照射中のビーム電流の変動を確認するため、2.2 項の SiC ワイヤを上流に設置し、照射中のビーム電流を二次電子電流により測定した。

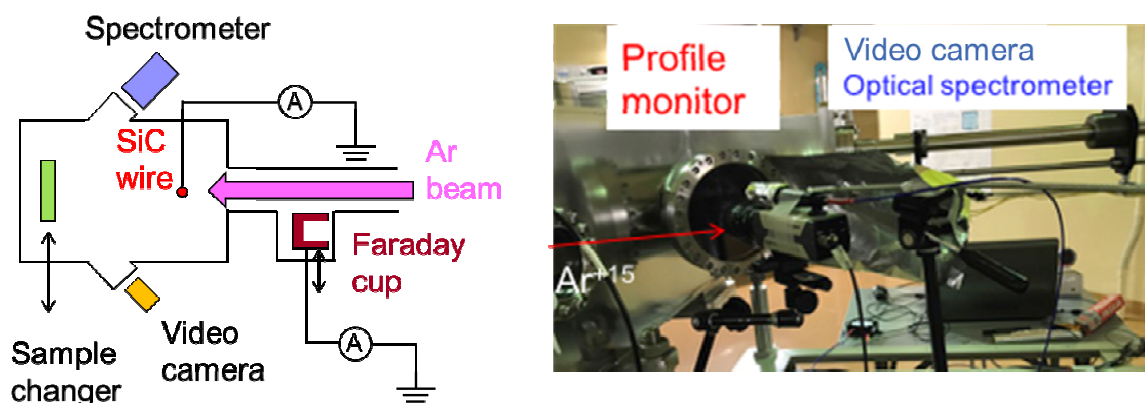


図 2 蛍光型プロファイルモニタの実験体系

### 2.2 SiC ワイヤ試験

実験体系を図 3 に示す。実験は、タンデム加速器の MT2 ポートにおいて行った。ビーム電流が約 30 nA となる  $^{60}\text{Ni}^{3+}$  イオン (10.5 MeV) を SiC ワイヤに入射し、ワイヤから生成する二次電子の電流をピコアンメータで観測し、SiC ワイヤにおける二次電子の生成効率の劣化を測定した。試料となる SiC ワイヤには、JSNS で使用されるものを用いた。照射中のビーム電流の変動を観測するため、定期的にファラデーカップによりビーム電流の測定を行った。ワイヤの温度の測定のため、サーモビューワを用いて温度を測定した。ワイヤとビーム停止部には 26 mm の距離を設け設置し、ビーム停止部の電子入射を抑えた状態においてワイヤで生じる二次電子電流を観測した。

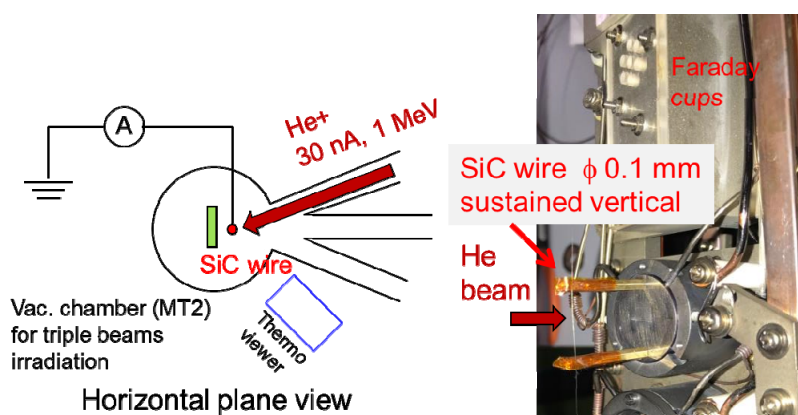


図 3 SiC ワイヤの二次電子の生成効率測定における実験体系

### 3. 結果及び考察、今後の展開等

#### 3.1 蛍光プロファイルモニタ試験

$^{40}\text{Ar}^{8+}$  ビーム（電流 約 30 nA）の照射中における、発光スペクトルの強度を定期的に測定した。ビームの初期照射時における、カメラで観測した蛍光状態を図 4 に示す。AF995R およびアルミナ溶射の試料において明確な蛍光を確認した。発光スペクトルを図 5 に示す。AF995R には、クロムに起因する 700 nm 付近に明確なピークが観測された。一方、Cr の含有量が少ないアルミナ溶射の場合には、このピークが観測されず広い波長における白色となるスペクトルを観測した。

照射に伴う蛍光量の減少の振舞いを表 1 に示す。表では、実験に用いた他の試料の時間的振舞いとして、700 nm 付近のピーク強度および 500 nm 以下の短波長領域の強度とその減衰の時定数を示す。試料への照射時間は 2~3 時間となり、dpa で換算すると ADS の約 100 時間程度の運転に相当するものとなった。蛍光量の減衰はあるものの、溶射により容易にプロファイルモニタは成立できるため、一つの候補となるものを取得できた。今後、さらに減衰の少ない材料や製作手法を探索する予定である。

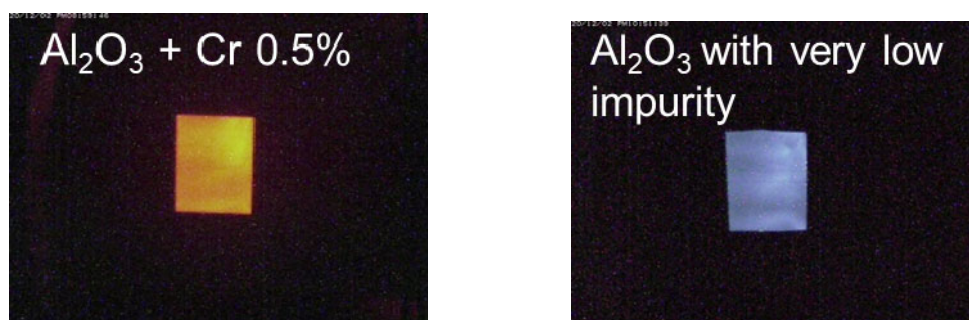


図 4: 蛍光型プロファイルモニタ試料のカメラによる蛍光状態の観測 (左: AF995R, 右: アルミナ溶射試料)

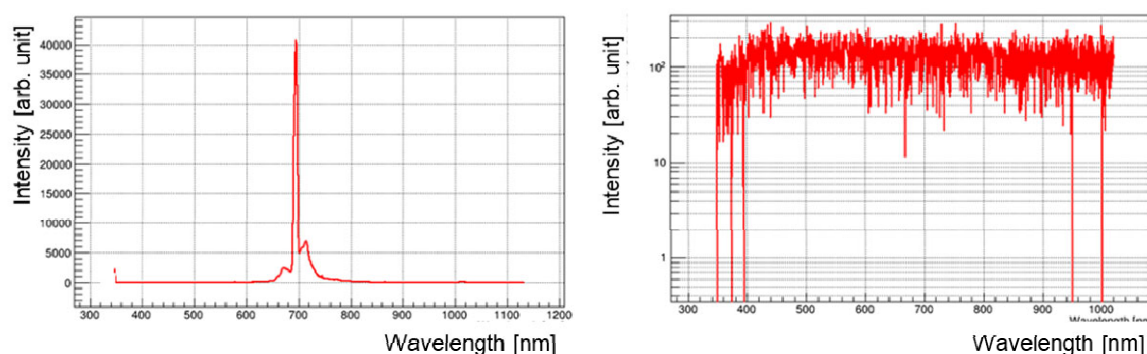


図 5: AF995R (左) とアルミナ溶射試料 (右) のビーム照射初期における蛍光スペクトル。

表 1: 各照射試料における照射開始時の蛍光量とその減衰時定数

| 試料     | Cr 量<br>[wt%] | 開始時発光量<br>[Arb. Unit] | 減衰係数<br>[1/s]        |
|--------|---------------|-----------------------|----------------------|
| AF995R | 0.5           | $2.4 \times 10^5$     | $1.6 \times 10^{-4}$ |
| 純アルミナ  | ~0            | $1 \times 10^2$       | $1.4 \times 10^{-4}$ |
| PA     | 0.65          | $2 \times 10^4$       | $6.3 \times 10^{-4}$ |
| 50P    | 0.3           | $4.5 \times 10^4$     | $6.9 \times 10^{-4}$ |
| PW     | 0.1           | $9 \times 10^3$       | $8.1 \times 10^{-4}$ |
| 50A    | ~0            | 50                    | 不明                   |

### 3.2 SiC ワイヤ試験

Ni ビーム照射中の SiC ワイヤにおける二次電子の電流の履歴を図 6 に示す。図の縦軸の二次電子は、入射するイオンビーム電流で規格化した。本測定による Ni イオンの照射量において、3.3 dpa において二次電子発生効率の低下はわずか 6%程度になった。

この dpa は、ADS などの数 GeV 陽子を照射する場合において、ピーク電流  $30 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  の条件で約 6,000 時間に相当するものとなる。長期間の大強度陽子ビーム運転において SiC の放射線劣化に起因する、プロファイルモニタとして性能を有することとなる。今後、更に SiC ワイヤの二次電子生成率に関して検討を進める予定となる。

なお、この研究において dpa 評価が重要となるため、当グループは J-PARC センターにおいて dpa 評価で重要な弾き出し断面積の実験的な研究[2]を進めた。この結果、信頼おける dpa の評価が様々なイオン種に対し適用可能[3]となり、本実験結果の数 GeV 陽子に対する適用性を向上させた。

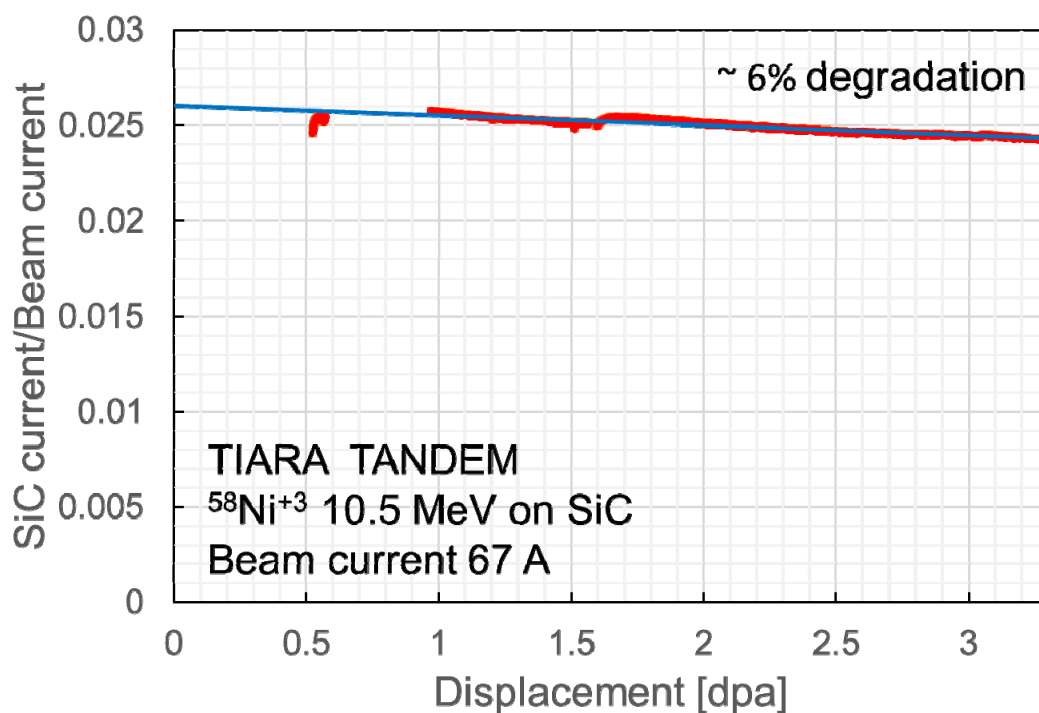


図 6: ビーム照射期間における SiC ワイヤの二次電子電流の挙動

### 4. 引用(参照)文献等

- [1] S. Meigo, et al., “Profile Monitor on Target for Spallation Neutron Source”, Proc. 6<sup>th</sup> Int. Beam Instr. Conf., IBIC 2017, Grand Rapid USA, pp. 373-375, (2017).
- [2] H. Matsuda, S. Meigo, Y. Iwamoto et al., J. Nucl. Sci. Technol. 57 1141 - 1151 (2020).
- [3] Y. Iwamoto, S. Meigo, S. Hashimoto, J. Nucl. Mater. 538 152261 (2020).